

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2018.02.15

基于复合系统协调度的地质环境承载能力定量评价方法研究

李亚民, 杨楠, 李瑞敏, 付小林, 孟晖
(中国地质环境监测院, 北京 100081)

摘要: 从限制性与安全性角度出发, 构建了地质环境承载能力评价指标体系。在此基础上, 将承载能力与社会经济系统中人口与 GDP 这 2 个指标相结合, 引入系统协调度概念, 构建了空间协调度与整体协调度定量化表达模型, 并首次提出利用地质环境-社会经济复合系统协调度评价结果来表达地质环境承载能力的方法。该研究成果能够在空间布局上有效呈现出承载本底与承载对象间的承载状态。同时, 该研究思路可用于其他有关要素的资源环境承载能力评价工作中, 亦可支撑地质环境开发利用与保护红线划定等领域的研究。

关键词: 地质环境; 承载能力; 协调度; 复合系统; 定量评价; 地质环境红线

中图分类号: X821

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2018)02-0096-06

Research on quantitative evaluation method of carrying capacity based on coordination degree of geological environment-socioeconomic complex system

LI Yamin, YANG Nan, LI Ruimin, FU Xiaolin, MENG Hui
(China Institute of Geo-environmental monitoring, Beijing 100081, China)

Abstract: From the point of restriction and safety, the evaluation index system of geological environment carrying capacity is constructed in this paper. On this basis, the carrying capacity is combined with the GDP and population of social economic system. By introducing system coordination concept, we build a quantitative expression model of spatial coordination degree and overall coordination degree. Then a method is proposed to express the carrying capacity of geological environment by using the evaluation results of the coordination degree of the geological environment and socio-economic composite system. The research results can effectively present the carrying state between the background and the load-bearing object in the spatial layout. At the same time, the research ideas can be used for carrying capacity evaluation of other relevant elements of the resources and environment, and can also support the study of the development, utilization and protection of the geological environment, the demarcation of the red line for environmental protection, the evaluation of regional development status and the layout rationality, the preparation of regional development planning, and the evaluation of the performance of ecological civilization construction.

Keywords: geological environment; carrying capacity; coordination degree; composite system; quantitative evaluation; geological environment red line

收稿日期: 2017-07-04; 修订日期: 2017-12-20

基金项目: 三峡库区生态环境承载能力示范研究(三峡后续工作科研项目 2016-2017 年)

第一作者: 李亚民(1978-), 男, 博士, 教授级高工, 主要从事地质环境监测、水工环地质调查评价研究等工作。

E-mail: lym151712@163.com

通讯作者: 杨楠(1982-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事水工环地质调查评价研究、环境遥感、地理信息系统等工作。

E-mail: yangn@mail.cigem.gov.cn

承载能力研究从早期的地基对建筑物的承载、牧场对牲畜的承载,到资源对经济社会的承载、环境对经济社会的承载、资源环境对经济社会的承载,承载能力的主体和客体都有了很大的延伸和扩展,但均可概括为自然系统的某些要素对社会经济系统某个方面的承载。承载能力的研究空间可以小到一块地、一个乡镇,大到省市、流域、国家等。承载能力的评价方法也从早期利用 Logistic 方程的简单评价,发展到了引入系统动力学、RS 技术、GIS 技术的复杂评价。值得注意的是,承载能力评价自从引入了 RS 和 GIS 技术,其结果的表达形式也就从单纯的总量(规模)承载发展到了总量(规模)承载与布局(空间)协调并重^[1-4]。

本文以三峡库区的奉节、巫山县生态屏障区为研究区,以地质环境为承载能力主体、社会经济系统为承载能力客体,从地质环境的空间差异性与社会经济系统的空间布局入手,引入复合系统协调度的概念,利用地质环境-社会经济复合系统的空间协调度、整体协调度的评价,探索小空间尺度大比例尺的地质环境承载能力评价成果的表达方式及成果应用方向。

1 地质环境限制性综合评价

地质环境限制性综合评价可单独反映地质环境子系统本身的承载本底的空间分布情况。本研究综合奉节、巫山县生态屏障区的地质环境特征和资源开发利用现状,选取了区域地壳稳定性、地质灾害易发程度、斜坡稳定性、地质遗迹和地质公园保护重要性等因子,进行地质环境限制性综合评价。

1.1 区域地壳稳定性评价

评价要求:明确区域内距今 12 万至 1 万年以来活动的或未来仍有可能活动的断裂分布情况;依据《中国地震动参数区划图》(GB 18306-2015),查询评价区地震动峰值加速度的具体数值。

评价内容:主要以活动断裂的活动时代表征评价断裂的活动性,以地震动峰值加速度表征评价地震作用强弱程度。

评价方法:根据调查资料,标注距今 12 万至 1 万年以来的活动断裂,编制评价区活动断裂分布图;以距活动断裂距离^[5-7]和地震动峰值加速度的大小^[8]进行区域地壳稳定性评价,稳定性分为极不稳定、不稳定、次不稳定、次稳定、稳定 5 个等级。

1.2 地质灾害易发程度评价

评价要求:明确区域可能发生的主要地质灾害类型与可能性大小。根据主要地质灾害的孕育机制分析地质灾害易发的区域分异规律,明确特定地质灾害可能发生的地区范围与可能程度。首先针对特定地质灾害类型进行评价,然后对多种地质灾害的易发程度进行综合分析,明确区域地质灾害易发的分布特征。

评价内容:在现有地质灾害调查、编目的基础上,通过地质灾害形成条件或形成地质灾害条件组合的分析评价,预测区域将来产生地质灾害的可能性,圈定出可能产生地质灾害的空间范围及活动强度。核心内容包括地质灾害特征、空间密度、易发条件和潜在易发区预测评价。一般包括崩塌、滑坡、泥石流、地面塌陷、地面沉降、地裂缝等灾害的易发程度。本次研究主要评价崩塌、滑坡、泥石流 3 种地质灾害的易发程度。

评价方法:依据地形地貌、地质构造、工程岩土性质、斜坡结构和斜坡水文地质条件等主要评价指标,分别评价崩塌滑坡易发程度、泥石流易发程度;按就高原则,将各易发程度分区结果叠加,形成崩塌滑坡泥石流易发程度分区评价结果,编制易发程度分区图;易发程度分为极高易发、高易发、中易发、低易发、不易发 5 个等级。请当地地质灾害专家,参考地质灾害调查与监测资料,对易发程度分区结果进行验证并修改完善。

1.3 斜坡稳定性评价

评价要求:掌握区域斜坡稳定性的空间分异规律;斜坡稳定性评价结果能够对人口和生产布局、斜坡治理工程等提供决策基础。

评价内容:主要考虑工程地质岩组、斜坡结构类型、斜坡坡度与高度等,进行斜坡稳定性初步评价;然后结合斜坡治理工程、人类工程活动等,完成斜坡稳定性区划。

评价方法:把影响斜坡稳定性的主要因子(工程地质岩组、斜坡结构类型、斜坡坡度、斜坡高度)进行单因子评价(表 1),再通过 ArcGIS 软件进行空间加权叠加分析(表 2),采用 Quantile 分类法进行稳定性等级划分;利用斜坡治理工程、人类工程活动等资料,对初步评价结果进行修正,完成斜坡稳定性区划。稳定性分为极不稳定、不稳定、次不稳定、次稳定、稳定 5 个等级。

表1 研究区斜坡稳定性评价因子等级评价表
Table 1 Rating scale for evaluation of slope stability

稳定性等级	极不稳定	不稳定	次不稳定	次稳定	稳定
斜坡结构类型	顺向坡	顺斜坡	横向坡	逆斜坡	逆向坡
斜坡坡度	> 70°	(60°,70°]	(50°,60°]	(40°,50°]	≤ 40°
斜坡高度	> 30 m	(10 m,30 m]	(5 m,10 m]	(3 m,5 m]	≤ 3 m

表2 研究区斜坡稳定性评价因子权重表
Table 2 Weight table for evaluation factors of slope stability

评价因子	工程地质岩组	斜坡结构类型	斜坡坡度	斜坡高度
因子权重	0.3	0.4	0.2	0.1

1.4 地质遗迹和地质公园保护重要性评价

评价要求:明确评价区内地质遗迹空间位置、类型、级别;明确评价区内地质公园空间分布范围和级别。

评价内容:主要包括单个地质遗迹点、地质公园保护区范围。地质遗迹是指在地球演化的漫长地质历史时期,由于各种内外地质作用形成、发展并遗留下来的珍贵的、不可再生的自然地质现象。地质公园是由多个相同或不同类型地质遗迹点构成、相对集中分布的其规模可满足建立保护区或地质公园的区域。

评价方法:地质遗迹可以分为基础地质类地质遗迹、地貌景观类地质遗迹、地质灾害类地质遗迹三大类。不同类型的地质遗迹按评价标准分为世界级、国家级、省级。地质遗迹是较为特殊的地质环境因子,依据国土资源部印发的《国家地质公园规划编制技术要求》(国土资发[2016]83号),划出地质遗迹以及地质公园的各级保护区范围。

1.5 综合评价

依据区域地壳稳定性、地质灾害易发程度、斜坡稳定性、地质遗迹和地质公园保护重要性等单因子评价结果,进行地质环境限制性综合评价(表3)。利用ArcGIS的Quantile方法,对地质环境限制性进行4级分区,即:强限制区、较强限制区、一般限制区和不限限制区,编制地质环境限制性区划图。

2 地质环境与社会经济复合系统协调度评价

复合系统协调度可度量子系统之间在发展过程中彼此和谐一致的程度,体现了复合系统由无序走向有序的趋势,是协调状况好坏程度的定量指标。本文在上述地质环境子系统本底评价的基础上结合社会经济子系统,从空间协调度、整体协调度两个角度评价了复合系统的发展状态。其中社会经济子系统选取人口和GDP空间分布密度两个指标。

表3 研究区地质环境限制性综合评价表

Table 3 Comprehensive assessment of the restrictive geological environment in the study area

因子类型	评价因子	因子分级	因子赋值	因子权重
强制型	区域地壳稳定性	极不稳定	0	1
		其他	1	
	地质遗迹和地质公园保护重要性	保护区	0	
		其他	1	
权重型	区域地壳稳定性	不稳定	10	0.3
		次不稳定	40	
		次稳定	70	
		稳定	100	
权重型	地质灾害易发程度	极高易发	20	0.3
		高易发	40	
		中易发	60	
		低易发	80	
权重型	斜坡稳定性	不易发	100	0.4
		极不稳定	20	
		不稳定	40	
		次不稳定	60	
		次稳定	80	
		稳定	100	

注:评价因子、限制性赋值及权重均为专家打分法得出的结果。

在理想状态下,社会经济系统的空间布局理应受到地质环境空间差异特征的影响和限制,比如,在地质环境强限制区内人口或GDP分布密度大,或者在地质环境低限制区甚至是不限制区内人口或GDP分布密度很低,这是极不合理的,也可以说系统协调度很低(相反则协调度很高)。基于上述思考,本研究构建了地质环境-社会经济复合系统空间协调度评价模型,通过编制相关图件反映研究区的空间协调程度。

为了对比不同研究区的协调程度,或者同一地区不同时段(过去、现状、规划期)的协调程度变化,本研究在空间协调度评价模型基础上建立了整体协调度评价模型,利用该模型可以进行研究区宏观的承载状态分析。协调度的概念体系如图1所示。

2.1 空间协调度

某一地区人口(GDP)分布与地质环境特征的空间协调度,可以反映人口(GDP)布局的地质环境条件合理性。利用ArcGIS的Quantile方法,进行4级分类(极大、大、中、小),编制人口(GDP)空间分布密度图。利用ArcGIS软件的空间分析功能,把地质环境限制性

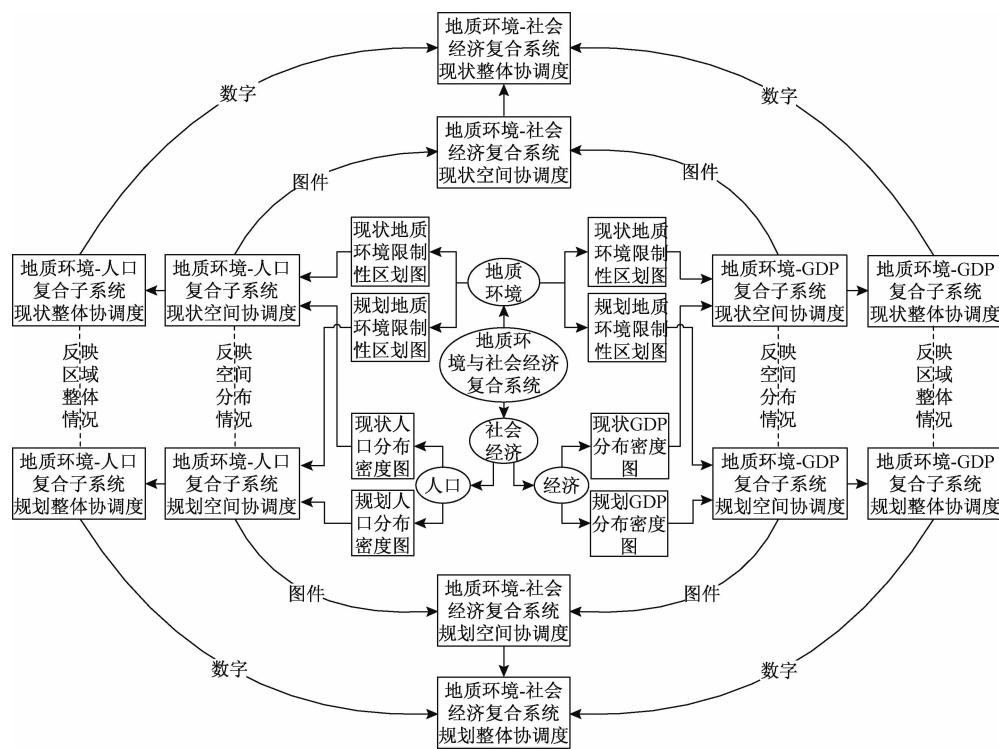


图 1 地质环境-社会经济复合系统协调度概念体系图

Fig. 1 Conceptual system diagram of the coordination degree of the geological environment-social and economic complex system

区划图与人口(GDP)空间分布密度图进行叠加分析,编制地质环境-人口(GDP)复合子系统空间协调度评价图。空间协调度从高到低分为 5 级:很高、高、中、低、很低(表 4)。

表 4 地质环境-人口(GDP)复合子系统空间协调度评价分级

Table 4 Evaluation and classification of the spatial coordination degree of the geological environment-population (GDP) composite subsystem

地质环境-人口(GDP)复合子系统空间协调度	人口(GDP)空间分布密度			
	极大	大	中	小
强限制	很低(V)	低(IV)	中(III)	高(II)
地质环境较强限制	低(IV)	中(III)	中(III)	中(III)
地质环境一般限制	高(II)	中(III)	中(III)	低(IV)
地质环境无限制	很高(I)	高(II)	低(IV)	很低(V)

2.2 整体协调度

(1)地质环境-人口复合子系统整体协调度(CI(地质)_{人口})采用式(1)计算:

$$CI(\text{地质})_{\text{人口}} = \beta_1 \frac{A_1}{A} + \beta_2 \frac{A_2}{A} + \beta_3 \frac{A_3}{A} + \beta_4 \frac{A_4}{A} + \beta_5 \frac{A_5}{A} \quad (1)$$

式中:A₁、A₂、A₃、A₄、A₅——分别表示表 4 中地质环境-人口复合子系统空间协调度评价结果中很高(I)、

高(II)、中(III)、低(IV)、很低(V)区的面积;

A——评价总面积, A = A₁ + A₂ + A₃ + A₄ + A₅;

β₁、β₂、β₃、β₄、β₅——协调系数,建议取值 1, 0.8, 0.6, 0.3, 0。

(2)地质环境-GDP复合子系统整体协调度(CI(地质)_{经济})采用式(2)计算:

$$CI(\text{地质})_{\text{经济}} = \lambda_1 \frac{B_1}{B} + \lambda_2 \frac{B_2}{B} + \lambda_3 \frac{B_3}{B} + \lambda_4 \frac{B_4}{B} + \lambda_5 \frac{B_5}{B} \quad (2)$$

式中:B₁、B₂、B₃、B₄、B₅——表 4 中地质环境-GDP复合子系统空间协调度评价结果中很高(I)、高(II)、中(III)、低(IV)、很低(V)区的面积;

B——评价总面积, B = B₁ + B₂ + B₃ + B₄ + B₅;

λ₁、λ₂、λ₃、λ₄、λ₅——协调系数,建议取值 1, 0.8, 0.6, 0.3, 0。

(3)地质环境-社会经济复合系统的整体协调度(CI(地质))采用公式(3)进行计算:

$$CI(\text{地质}) = \alpha_1 \cdot CI(\text{地质})_{\text{人口}} + \alpha_2 \cdot CI(\text{地质})_{\text{经济}} \quad (3)$$

式中: α_1, α_2 ——权重系数,建议取值 0.5,0.5。

3 协调度评价成果的服务应用方向

通过地质环境-人口(GDP)复合子系统现状(规划)空间协调度,可以明确人口迁移、产业结构调整、企业搬迁或地质环境整治工作的必要性以及这些应对措施的时间和空间安排(明确各类空间规划修编的必要性和修编的具体内容)。

通过同一地区、不同时间的地质环境-人口(GDP)复合子系统现状(规划)整体协调度的对比情况,反映该地区以往人口迁移、产业结构调整、企业搬迁或工程活动影响地质环境(包括地质环境整治)等方面工作的效果(预测该地区各类空间规划实施在人口迁移、产业结构调整、企业搬迁或工程活动影响地质环境包括地质环境整治等方面工作的效果)。

通过同一时间、不同地区的地质环境-人口(GDP)复合子系统现状(规划)整体协调度的变化情况,对比不同地区人口迁移、产业结构调整、企业搬迁或工程活动影响地质环境包括地质环境整治等方面工作的现实效果,亦可服务于上级政府对两个以上的下级政府的绩效考核(对比预测不同地区各类空间规划实施在人口迁移、产业结构调整、企业搬迁或工程活动影响地质环境包括地质环境整治等方面工作的效果)。

4 实例研究

研究区位于三峡库区奉节县与巫山县的生态屏障区范围内,即奉节县与巫山县内三峡大坝前 175 m 淹没线至第一道山脊线的区域,面积约为 844.06 km²,其中奉节生态屏障区面积 356.70 km²,巫山生态屏障区面积 487.36 km²。

研究区地质环境限制性评价的结果统计如表 5 所

表 5 研究区地质环境限制性分区统计表

Table 5 Statistical table of restricted zones of geological environment in the study area

区县名称	总面积/km ²	强限制区		较强限制区		一般限制区		不限制区	
		面积/km ²	比例	面积/km ²	比例	面积/km ²	比例	面积/km ²	比例
奉节	356.70	1.05	0.3%	74.55	21.0%	146.82	41.2%	134.28	37.5%
巫山	487.36	91.30	18.7%	44.84	9.2%	202.51	41.6%	148.74	30.5%
总计	844.06	92.30	10.9%	119.40	14.1%	349.34	41.4%	283.02	33.5%

对比研究巫山和奉节县城城镇规划建设区的地质环境-社会经济复合系统整体协调度,2000—2014 年期间,巫山县城和奉节县城的城镇规划建设区的整体协调度分别由 0.48 和 0.39 提升到 0.56 和 0.55,说明奉节县在地质灾害防治、土地整治、人口搬迁以及产业

示,其中强限制区面积 92.3 km²,占 10.9%,主要受到地质环境保护因素的影响,分布在巫山神女风景区、巫山小三峡景区和白帝城景区,如巫山县的抱龙、巫峡、大昌等乡镇,奉节县的白帝、永安等乡镇;较强限制区面积 119.4 km²,占 14.1%,主要是受斜坡稳定性影响,分布在斜坡稳定性为欠稳定区及不稳定区,如地质灾害易发地层且顺向坡区(如安坪镇),或者坡度陡(坡度 45°以上)以及高程大于 800 m 区域;一般限制区面积 349.34 km²,占 41.4%,主要分布在斜坡稳定性为基本稳定至欠稳定区域,或地形坡度较陡(坡度 20°以上)以及高程在 450 m 以上区域,区内地质灾害比较发育,如抱龙、巫峡、康乐、鹤峰等乡镇的部分区域;不限制区面积 283.02 km²,占 33.5%,区内地质环境条件较好,大部分分布在临江高程 450 m 以下、坡度在 20°以内的斜坡稳定性较好(稳定至基本稳定)的区域,如大昌、培石、曲尺、巫峡、安坪、白帝、康乐、永安、朱衣等乡镇的部分区域。

生态屏障区地质环境-社会经济复合系统的整体协调度评价结果表明:(1)2000 年地质环境-人口复合子系统整体协调度为 0.495,说明 2000 年研究区人口的空间分布格局基本合理但仍然处于偏低的水平,有部分居住区处于地质环境安全风险之中;2000 年的地质环境-GDP 复合子系统整体协调度为 0.318,处于较低水平,说明 2000 年研究区经济的空间分布在某些区域与地质环境本身限制性存在较大冲突,经济结构的空间布局应该注意地质环境的影响。(2)2000 年到 2014 年,地质环境-社会经济复合系统的整体协调度发生了较大变化,由 2000 年的 0.41 提升为 2014 年的 0.53。究其原因,主要是得益于这段时期内三峡库区崩塌滑坡、塌岸和高切坡等地质灾害隐患点的规模性集中防治,以及人口分布、产业结构和空间布局的逐步优化。

结构和布局调整方面投入的工作力度更大,取得了更为明显的效果。

5 结论及建议

(1) 本文首次提出的地质环境-社会经济复合系

统的空间协调度、整体协调度的概念以及量化评价模型,探索了从实用角度表达地质环境承载能力的方法。本次研究不仅评价了奉节和巫山地质环境-社会经济复合系统的协调度,还评价了生态环境-社会经济复合系统、土地资源-社会经济复合系统的协调度,对比了生态屏障区3个复合系统2000—2014年的变化情况,并系统分析了变化的原因,评价的结果与当地的实际情况十分一致。

(2)在地质环境限制性综合评价过程中,强制型评价因子不限于本文表3中所列;强限制区可以直接划定为地质环境开发利用与保护红线区。其他地区进行地质环境限制性综合评价时,要根据研究区自身的地质环境特征与资源禀赋条件及开发利用情况,对地质环境限制性评价因子进行适当的增减(比如可以增加地下水易污性评价因子等),并通过专家打分、德尔斐、层次分析等方法确定相应评价因子的权重。

(3)资源(环境)-社会经济复合系统的空间协调度评价结果可以为区域国土空间布局优化、红线体系划定、自然资源资产管理、各类空间规划的编制和修编提供地块级的技术支撑建议。整体协调度的评价结果既可以在不同研究区内进行横向对比,也可以在相同地区进行纵向对比;既可以评价各类相关工作的成效,也可以作为生态文明建设绩效考核的评价依据。

参考文献:

- [1] 张红. 国内外资源环境承载力研究述评[J]. 理论学刊, 2007(10): 80-83. [ZHANG H. Review of research on resources and environment carrying capacity at home and abroad [J]. Theory Journal, 2007(10): 80-83. (in Chinese)]
- [2] 张保成, 国锋. 自然资源承载力问题研究综述[J]. 经济经纬, 2006(6): 22-25. [ZHANG B C, GUO F. A review of studies on the carrying capacity of natural resources [J]. Economic Survey, 2006(6): 22-25. (in Chinese)]
- [3] 国土资源部资源环境承载力重点实验室. 资源环境承载力评价监测与预警思路设计[J]. 中国国土资

源经济, 2014, 27(4): 20-25. [Key Laboratory of carrying capacity assessment for resources and environment, Ministry of land and resources. Evaluation monitoring and the idea of warning and concerning carrying capacity on resources and environment [J]. Natural Resource Economics of China, 2014, 27(4): 20-25. (in Chinese)]

- [4] 程国栋. 承载力概念的演变及西北水资源承载力的应用框架[J]. 冰川冻土, 2002, 24(4): 361-367. [CHENG G D. Evolution of the concept of carrying capacity and the analysis framework of water resources carrying capacity in Northwest of China [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, 24(4): 361-367. (in Chinese)]
- [5] 董津城. 发震断裂的安全距离规定简介—《建筑抗震设计规范》修订简介(五)[J]. 工程抗震, 1999(2): 14-16. [DONG J C. Brief introduction to safety distance requirements for earthquake rupture - brief introduction to the revision of building seismic design code (five) [J]. Earthquake Resistant Engineering, 1999(2): 14-16. (in Chinese)]
- [6] 徐锡伟, 于贵华, 马文涛, 等. 活断层地震地表破裂“避让带”宽度确定的依据与方法[J]. 地震地质, 2002, 24(4): 470-481. [XU X W, YU G H, MA W T, et al. Evidence and methods for determining the safety distance from the potential earthquake surface rupture on active fault [J]. Seismology and geology, 2002, 24(4): 470-481. (in Chinese)]
- [7] 王爱国, 马巍, 石玉成. 活动断裂地震变形与重大工程场地安全距离研究[J]. 地震研究, 2005, 28(4): 359-364. [WANG A G, MA W, SHI Y C. Study on the potential earthquake deformation of active fault and the safe distance of important project site to active fault [J]. Journal of seismological research, 2005, 28(4): 359-364. (in Chinese)]
- [8] GB 18306-2015 中国地震动参数区划图[S]. [GB 18306-2015 Seismic ground motion parameters zonation map of China[S]. (in Chinese)]

责任编辑: 汪美华